

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET**

**IVA PEJAK**

**PRISUTNOST RADONA U OKOLIŠU I UTJECAJ NA LJUDSKO ZDRAVLJE**

**ZAVRŠNI RAD**

**VARAŽDIN, 2018.**

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET**

**ZAVRŠNI RAD**

**PRISUTNOST RADONA U OKOLIŠU I UTJECAJ NA LJUDSKO ZDRAVLJE**

**KANDIDAT:**

**IVA PEJAK**

**MENTOR:**

**Doc.dr.sc. ANITA PTIČEK SIROČIĆ**

**NEPOSREDNI VODITELJ:**

**DAVOR STANKO, mag.phys**

**VARAŽDIN, 2018.**

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom

### **PRISUTNOST RADONA U OKOLIŠU I UTJECAJ NA LJUDSKO ZDRAVLJE**


rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **doc.dr.sc. Anita Ptiček Siročić**.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 06. 07.2018.

Ime i prezime: Iva Pejak

OIB: 26586609022

Vlastoručni potpis: 

## SAŽETAK

Radon ( $^{222}\text{Ra}$ ) je prirodni radioaktivni element u plinovitom stanju bez boje i mirisa, a nastaje kao potomak u radioaktivnim nizovima urana. Ljudi su svakodnevno izloženi određenoj koncentraciji radona koji se nalazi u zemlji, vodi, zraku i hrani. Koncentracija radona u zraku koji se udiše prilično je niska, no može biti visoka unutar stambenog prostora u koji može prodrijeti iz temeljnog tlapreko podruma u samu građevinu. Radon se smatra jednim od najčešćih uzročnika karcinoma pluća prvenstveno zbog udisanja. Štetni utjecaj prisutnosti radona unutar stambenih prostora može se smanjiti čestim provjetravanjem prostorija u kojima ljudi borave.

Postoje različite mjerne metode i tehnike zamjerenje koncentracije radona u okolišu. Najčešće se koristi tehnika mjerenja usisavanja zraka preko aerosolnog filtera, pri čemu se koncentracija radona i pripadnih izotopa u zraku određuje iz aktivnosti raspada nestabilnih izotopa na temelju vremena poluraspada. Prosječne izmjerene vrijednosti koncentracije radona po županijama diljem Hrvatske kreću se od 33 – 198 Bq/m<sup>3</sup> što je unutar zakonskih okvira Europske unije.

S obzirom na prisutnost radona u okolišu i njegov utjecaj na ljudsko zdravlje, potrebna su daljnja mjerenja u stambenim prostorima diljem Hrvatske, ali i u tlu i vodi kako bi se dobile informacije o koncentracijama radona u okolišu.

**Ključne riječi:** radon, vrijeme poluraspada, koncentracija radona, ljudsko zdravlje, okoliš

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. RADON.....</b>	<b>2</b>
2.1. Radioaktivnost.....	2
2.2. Zakon radioaktivnog raspada .....	5
2.3. Zračenje.....	7
<b>2.4. Fizikalno – kemijske karakteristike radona.....</b>	<b>8</b>
2.5. Izvori radona u okolišu .....	14
2.6. Načini mjerenja koncentracije radona .....	16
2.6.1. Mjerenje koncentracije radona u zraku .....	16
2.6.2. Mjerenje koncentracije radona u vodi i tlu.....	18
<b>3. ŠTETNI UTJECAJI RADONA NA LJUDSKO ZDRAVLJE .....</b>	<b>22</b>
3.1. Radon u kućama (zatvoreni prostor) .....	22
3.2. Radon u vodi .....	23
3.3. Efektivne godišnje doze radona za ljude.....	24
3.4. Radon i ljudsko zdravlje .....	26
<b>4. RADON U REPUBLICI HRVATSKOJ.....</b>	<b>28</b>
<b>5. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>30</b>
<b>6. LITERATURA.....</b>	<b>31</b>
<b>7. POPIS SLIKA .....</b>	<b>34</b>
<b>8. POPIS TABLICA .....</b>	<b>35</b>

## 1. UVOD

Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) je prirodni plemeniti radioaktivni plin čiji je glavni izvor tlo. Radon nastaje radioaktivnim raspadom iz radioaktivnih nizova, primjerice uranija-238 ( $^{238}\text{U}$ ), koji se nalazi u Zemljinoj kori. Na svom putu prema atmosferi radon se miješa sa zrakom koji ljudi udišu i unose u organizam. Kao glavna posljedica prisutnosti velikih koncentracija radona u okolišu je nastanak smrtonosnog karcinoma na plućima (disanjem) te karcinoma želuca (unošenjem vode u organizam) [1].

Radon je plin bez boje i okusa te se može detektirati jedino mjerenjem njegove koncentracije u okolišu. Koncentracija aktivnosti radona je broj radioaktivnih raspada atoma radona u jedinici vremena i obujmote se iskazuje bekerelima po kubnom metru ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ). Skraćeno se naziva i koncentracija radona. Koncentracija radona značajno se mijenja u vremenu, kako tijekom dana tako i tijekom godine. Stoga je za pouzdaniju procjenu doze zračenja radona i njegovih kratkoživućih potomaka u okolišu, potrebno vršiti mjerenja najmanje godinu dana i više. Mjerenje se obavlja pomoću posebno razvijenih detektora nuklearnih tragova koji su izloženi u prostoru u kojem ljudi najčešće borave [2].

Prema istraživanjima koja su provedena u stambenim prostorima Republike Hrvatske, koncentracija radona varira od županije do županije. Primjerice, Istarska, Karlovačka, Ličko-senjska i Sisačko-moslavačka županija su županije s najvećom izmjerenom koncentracijom radona u rasponu od 101 do 200  $\text{Bq}/\text{m}^3$ , dok u Baranji, Požeško-slavonskoj i Brodsko-posavskoj županiji koncentracija radona iznosi od 51 do 100  $\text{Bq}/\text{m}^3$  [2].

Cilj ovog rada je istražiti na koji način je radon prisutan u okolišu te utvrditi korisne i štetne utjecaje, kao i moguće načine sprečavanja štetnih učinaka.

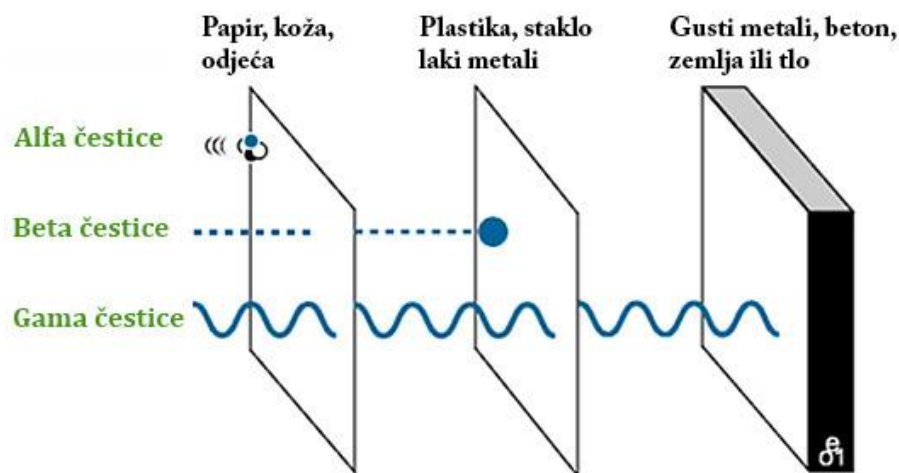
## 2. RADON

### 2.1. Radioaktivnost

Radioaktivnost ili radioaktivni raspad je svojstvo nekih atoma da im se jezgre spontano raspadaju uslijed čega dolazi do stvaranja drugih elemenata uz emisiju radioaktivnog zračenja.

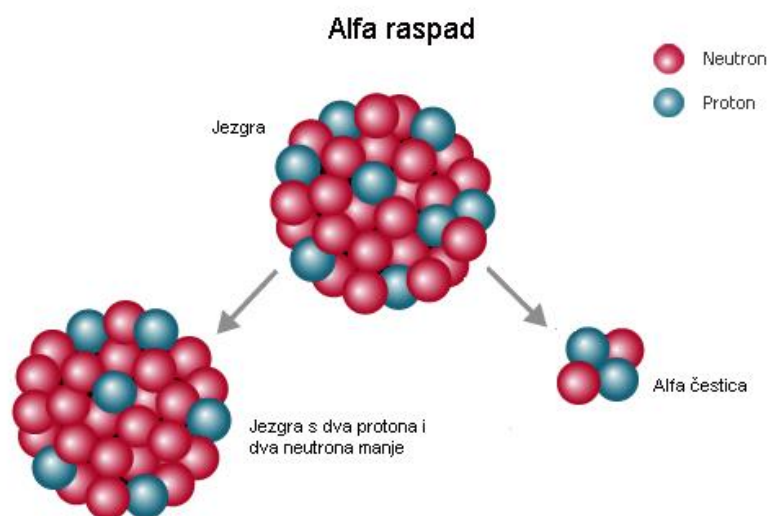
Radioaktivno zračenje mijenja strukturu i svojstva materijala kroz koje prolazi. Pri tome je najznačajniji efekt ionizacija, odnosno izbijanje elektrona iz elektronskog omotača nekog atoma. Atomi i molekule uobičajeno se nalaze u neutralnom stanju tj. broj pozitivnih protona u jezgri jednak je broju negativnih elektrona u ljusci. Ako atom, uslijed sudara s drugom česticom (npr. fotonom, drugim elektronom) izgubi elektron, novonastali atom naziva se ion i njegova se svojstva uvelike razlikuju od originalnog atoma. Ionizirajuće zračenje se može sastojati od snopa čestica visokih energija (elektrona, protona ili  $\alpha$  – čestica) ili elektromagnetskog zračenja visoke frekvencije (gama-zračenje) koje može imati poguban učinak na molekule tvari, a posebno na biološka tkiva. Mjerna jedinica za energiju čestica i elektromagnetskog zračenja naziva se elektronvolt (eV), a koristi se izvedena jedinica mega-elektronvolt (MeV). Rendgensko zračenje, posebno njegova primjena u medicini, danas je poznata u široj javnosti, ali prije stotinjak godina njegovo postojanje nije bilo poznato[3].

Prva istraživanja su pokazala da iz radioaktivnih tvari (npr. uranijevih spojeva) izlazi prirodno zračenje koje zacrnjuje fotografsku ploču čak i kad je umotana u crni papir. Kada je zračenje propušteno kroz magnetsko polje tako da je snop zračenja okomit na polje, jedan njegov dio otklanjao se na jednu stranu, drugi na drugu stranu, a treći je prolazio neotklonjen. Te tri vrste zračenja označene su grčkim slovima i nazvane  $\alpha$ -zrake,  $\beta$ -zrake i  $\gamma$ -zrake [3].



**Slika 1.** Prodornost  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  čestica [4]

$\alpha$ -raspad ili  $\alpha$ -radioaktivnost je proces u kojem radioaktivne jezgre spontano emitiraju  $\alpha$ -česticu, koja sadrži dva protona i dva neutrona u obliku jezgre  ${}^4_2\text{He}$  (Slika 2.).  $\alpha$ -raspad događa se samo kod vrlo teških elemenata kao što su uranij, torij i radij. Jezgra tih atoma je vrlo „bogata neutronima“ (ima puno više neutrona nego protona u jezgri), što omogućava emisiju  $\alpha$ -čestice.  $\alpha$ -čestice su, u odnosu na druge tipove zračenja, velikih dimenzija i nose dvostruki pozitivan naboj te nemaju veliku prodornosti zaustavljaju se papirom, kožom ili odjećom (Slika 1.). Elementi koji ih emitiraju nisu opasni dok na ljude djeluju izvana kratkotrajno, ali vrlo su štetni ako se unesu u organizam. U ljudskom tkivu putuju vrlo kratko, no zbog svoje velike energije na tom kratkom dijelu puta čine velika oštećenja, koja nisu vidljiva jer izazivaju unutarnje promjene na kromosomima te pojavu zloćudnih tumora [3].

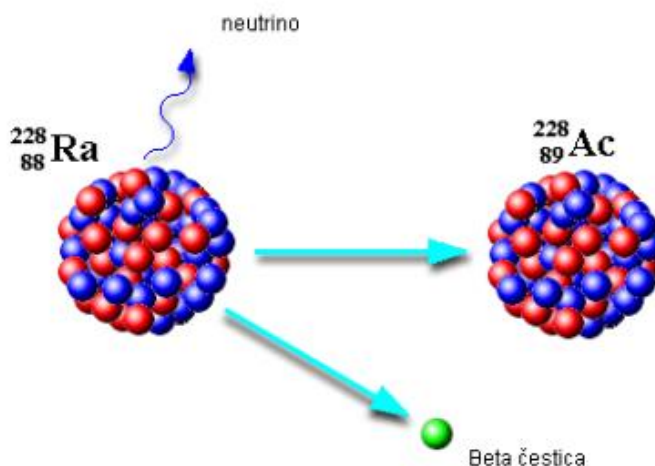


**Slika 2.**  $\alpha$ -raspad [5]



$\beta$ -raspad ili  $\beta$ -radioaktivnost je proces u kojem radioaktivna jezgra spontano mijenja svoju građu tako da se jedan neutron pretvori u proton ili jedan proton u neutron. Razlikuju se tri tipa  $\beta$ -raspada:  $\beta$ -minus raspada,  $\beta$ -plus raspada, elektronski uhvat. Beta-čestice ili elektroni iznimno su malene u usporedbi s  $\alpha$ -česticama i nose jednostruki negativni naboj. Prodornost im je veća nego prodornost  $\alpha$ -čestica, ali mogu biti zaustavljene već tankim slojem aluminija (Slika 1.). U ljudskom tkivu prodiru dublje, ali izazivaju mnogo manja oštećenja kao što su oštećenja na koži ili tkivu.

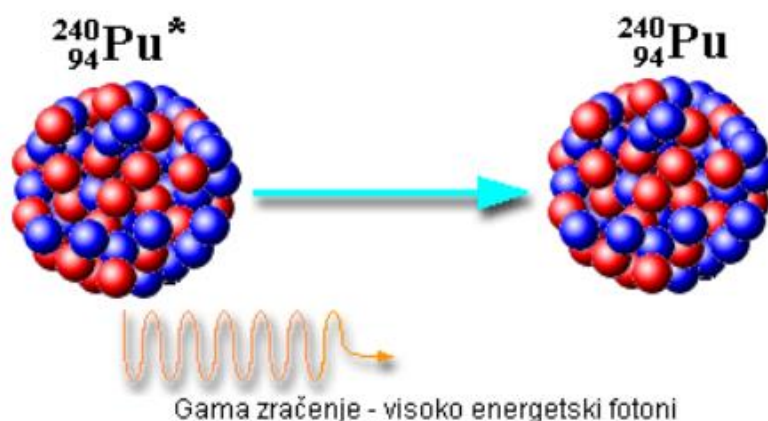
Slika 3. prikazuje jedan od tri tipa  $\beta$ -raspada, točnije  $\beta$ -plus raspada. Pri  $\beta$ -plus raspadu jedan proton u jezgri pretvara se u neutron, a iz jezgre izlijeću dvije čestice, antielektron i neutrino. Antielektron, koji nastaje pri ovom raspadu, ima jednaku masu kao i elektron, ali mu je električni naboj suprotan, tj. jednak je naboju protona. Za antielektron koristi se i naziv pozitron. Neutrino je čestica bez naboja i mase, uopće ne djeluje ili jako teško djeluje na bilo koju tvar kroz koju prolazi pa praktički nema nikakva učinka [2]. U ovom  $\beta$ -plus raspadu broj protona u jezgri smanji se za jedan, a broj neutrona se poveća za jedan te se maseni broj jezgre ne mijenja.



**Slika 3.**  $\beta$ -raspad [6]

Elektromagnetsko zračenje koje emitiraju atomske jezgre naziva se  $\gamma$ -zračenje, a fotoni tog raspada  $\gamma$ -fotoni (Slika 4.). Proces pri kojemu atomske jezgre emitiraju  $\gamma$ -zračenje zove se radioaktivni  $\gamma$ -raspadom, a svaku atomsku jezgru koja emitira  $\gamma$ -zračenje, gama radioaktivnom. Energija gama-fotona iz atomskih jezgara milijun je puta veća nego one koje emitiraju atomi. Zbog svoje velike energije fotoni gama-zračenja

vrlo su prodorni i oštećuju elektronske omotače atoma i molekula na koje nalijeću. Zbog toga djeluju razorno i na tkivu živih bića. U gama raspadu ne mijenja se ni maseni ni redni broj jezgre.  $\gamma$ -zračenje ima primjenu u medicini jer je ista vrsta zračenja kao i rendgensko zračenje.



**Slika 4.**  $\gamma$  – raspad [7]

## 2.2. Zakon radioaktivnog raspada

Radioaktivni raspad je statističke prirode te se ne može predvidjeti kada će se određena jezgra raspasti, ali moguće je izračunati vjerojatnost da se proces dogodi.

Brzina kojom se raspada radioaktivna atomska jezgra:

$$-\frac{dN}{dt} = N\lambda \quad (1)$$

(gdje je član s lijeve strane  $(-\frac{dN}{dt})$  brzina raspada jezgre (minus nam govori da se broj jezgri smanjuje), a  $\lambda$  je konstantnom raspada i različita je za svaki radioaktivni nuklid dok je  $N$  početni broj jezgri);proporcionalan je broju radioaktivnih jezgri u uzorku

$$\frac{dN}{dt} \sim -\lambda N \quad (2)$$

Rješavanjem diferencijalne jednadžbe(1) dobiva se izraz zakona radioaktivnog raspada tj. broj neraspadnutih jezgri u nekom radioaktivnom uzorku nakon vremena  $t$ , vremena ako je početni broj jezgri bio  $N_0$ :

$$N = N_0 * e^{-\lambda t} \quad (3)$$

Vrijeme poluživota  $T_{1/2}$  označava vremenski interval unutar kojeg se raspadne polovina jezgri (kao što je prikazano na Slici 5.)

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (4)$$

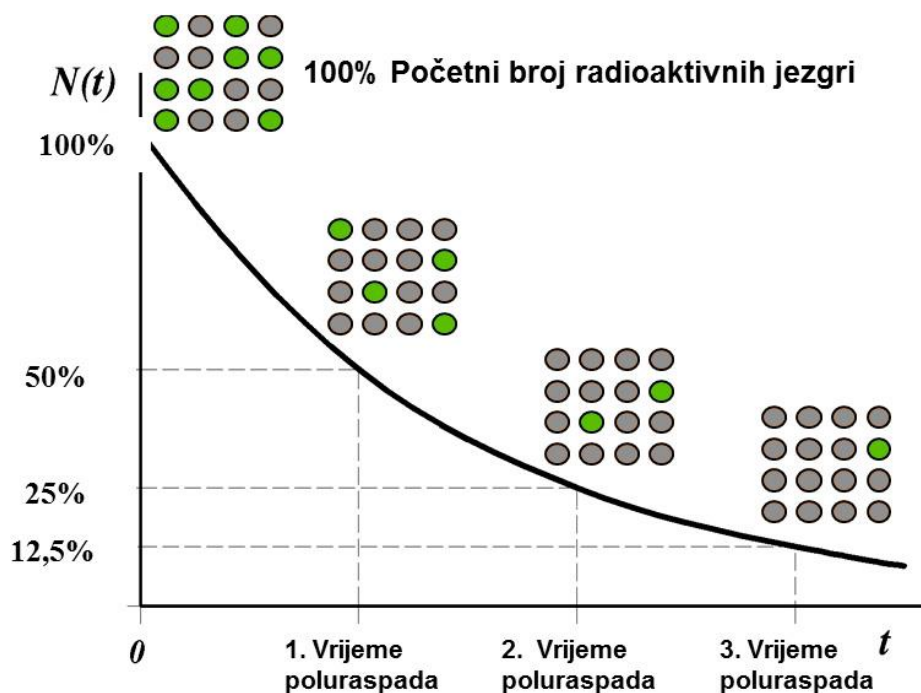
Aktivnost je broj raspada u jedinici vremena,

$$A = \frac{dN}{dt} = N_0 * \lambda * e^{-\lambda t} = \lambda n \quad (5)$$

Zakon radioaktivnog raspada statističke je prirode te samo daje vjerojatnost da se atom raspadne u nekom vremenskom intervalu između  $t_0$  i  $t_0 + \Delta t$ . Neki atomi će se raspasti gotovo trenutno, dok će drugima za to trebati mnogo više vremena [8].

Međunarodni sustav mjerna jedinica (SI sustav) za aktivnost je *bekerel* (Bq) i predstavlja jedan raspad u sekundi. Mjerna jedinica koja se još koristi je *kiri* (Ci) koji je definiran kao:

$$Ci = 3,7 * 10^{10} \text{ Bq [8]}. \quad (6)$$

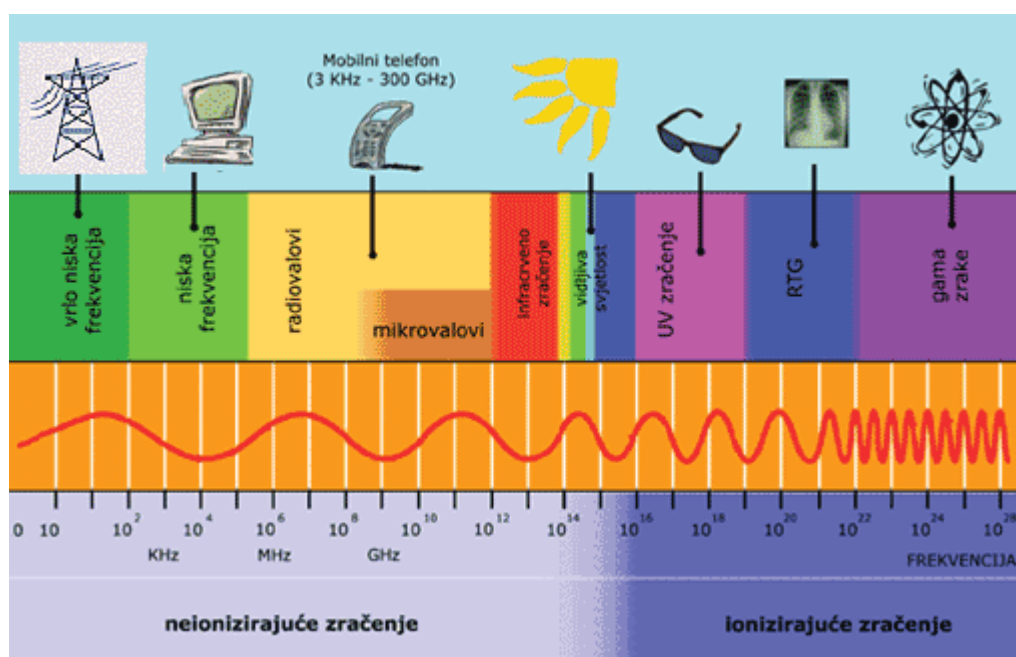


**Slika 5.** Krivulja radioaktivnog raspada i vrijeme poluraspada atomske jezgre [9]

## 2.3. Zračenje

Zračenje je pojam kojim se označava prijenos energije ili čestica prostorom ili kroz tvari u obliku elektromagnetskih valova ili subatomske čestice. Ionizacija je proces kojim atomi gube, katkad i dobivaju elektrone te od neutralnih postaju električki nabijene čestice tj. ioni.

Razna zračenja radionuklida ioniziraju stvari kroz koje prolaze kao i rendgenske zrake. Sva ionizirajuća zračenja štetna su za živčano tkivo, iako je šteta blaga, tkivo se može samo regenerirati bez trajnog efekta. Opasnost od zračenja lako se podcjenjuje jer obično postoji odgoda, ponekad mnogo godina, između izloženosti i nekih drugih mogućih posljedica. Te posljedice uključuju rak, leukemiju i promjene u rasplodnim stanicama koje mogu dovesti do oboljele djece s tjelesnim deformacijama i metalnim hendikepom. Zračenja koja emitiraju vodovi, mobiteli i razni elektronski uređaji u kući nazivaju se neionizirajućim zračenjem (Slika 6.) [10].



**Slika 6.** Spektar elektromagnetskog zračenja [11]

Doziranje zračenja mjeri se u *sivertima* (Sv), gdje je 1 Sv količina bilo kojeg zračenja koji ima iste biološke učinke kao one proizvedene kada 1 kg tjelesnog tkiva apsorbira 1 J x-zraka ili gama zraka. Povezana jedinica koja se ponekad koristi je *rem*, a jednaka je 0,01 Sv. Iako se radiobiolozi ne slažu oko točnog odnosa (veze) između izlaganja zračenja i vjerojatnosti razvoja raka ili leukemije, nema sumnje da takva

poveznica postoji. Prirodni izvori zračenja dovode do stope doziranja otprilike 3 mSv/god prosječno prema stanovništvu SAD-a ( $1 \text{ mSv} = 0,001 \text{ Sv}$ ). Dok drugi izvori zračenja kao i medicinske X-zrake (koje pridonose najvećem iznosu) dodaju 0,6 mSv/god; također tipična mamografija uključuje dozu od 0,7 mSv/god. Tako da ukupni iznos po osobi tako iznosi otprilike 3,6 mSv/god [10].

## 2.4. Fizikalno – kemijske karakteristike radona

Atomska jezgra, koja se radioaktivno raspadne, naziva se jezgra roditelj, a jezgre koje nastaju raspadom jezgara roditelja nazivaju se potomcima ili kćerima. Ako se potomci također radioaktivno raspadaju, tvore se nizovi elemenata koji se redom jedan za drugim raspadaju. Na Slici 7. prikazan je lanac radioaktivnog raspada  $^{238}\text{U}$ .



Slika 7. Lanac radioaktivnog raspada  $^{238}\text{U}$  [12]

Radioaktivni nizovi su skupine prirodnih radionuklida koji nastaju jedni od drugih. Početni radionuklid je onaj s najduljim vremenom poluraspada, a konačni su radionuklidi stabilni. Budući da se prirodnom radioaktivnošću maseni broj atomske jezgre može promijeniti samo za 4, svi radionuklidi mogu se svrstati u četiri niza s masenim brojevima  $A$  koji zadovoljavaju:  $A = 4n + k$ , gdje je  $n$  prirodan broj, a  $k = 0, 1, 2, 3$  (Tablica 1.).

**Tablica 1.** Radioaktivni raspadni nizovi [13]

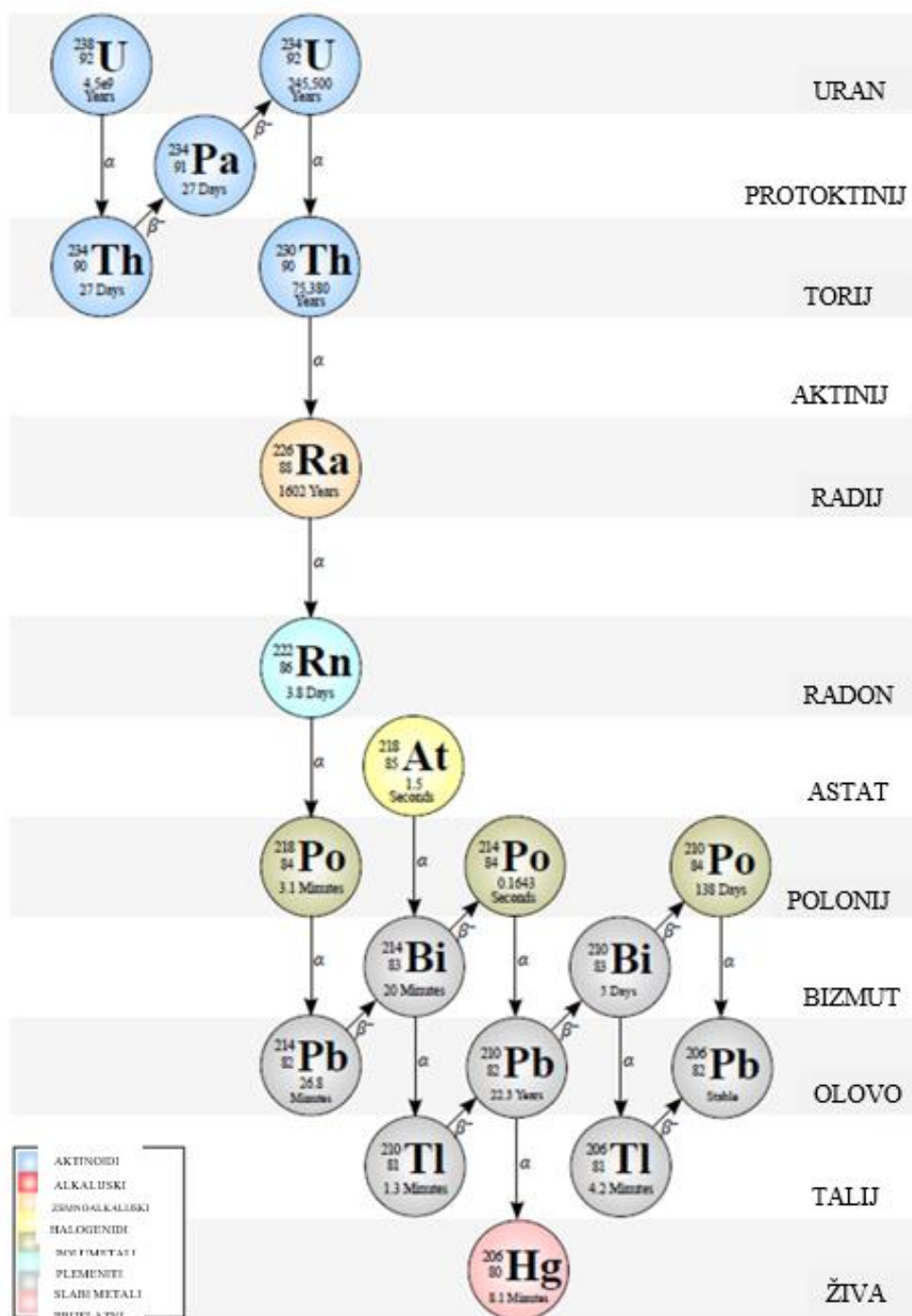
Niz	k	Radionuklid s najduljim vremenom poluraspada	Vrijeme poluraspada početnog radionuklida	Konačan nuklid
Torijev	0	$^{232}\text{Th}$	$1,41 \cdot 10^{10}$	$^{208}\text{Pb}$
Neptunijev	1	$^{237}\text{Np}$	$2,14 \cdot 10^6$	$^{209}\text{Bi}$
Uranijev	2	$^{238}\text{U}$	$4,47 \cdot 10^9$	$^{206}\text{Pb}$
Aktinijev	3	$^{235}\text{U}$	$7,04 \cdot 10^8$	$^{207}\text{Pb}$

Na Zemlji prirodno postoje samo produkti triju nizova: uranijeva, aktinijeva i torijeva, dok su se svi članovi neptunijeva niza zbog kratkog vremena poluraspada već odavno raspali. Prirodna radioaktivnost potječe od približno 60 prirodnih radionuklida koji se nalaze u tlu, zraku i vodi.

Svi izotopi radona su radioaktivni i nastaju kao proizvodi raspadnih nizova uranija (Slika 8.), aktinija (Slika 9.) i torija. Najznačajniji izotop je  $^{222}\text{Rn}$  (radon) i nastaje  $\alpha$  raspadom izotopa radija 226 i pripada uranijevom raspadnom nizu. Vrijeme poluraspada  $^{222}\text{Rn}$  je  $t_{1/2} = 3,825$  dana, a prosječno vrijeme života  $\tau = 5,51$  dan. Ovaj izotop ima četiri kratkoživuća potomka:  $^{218}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  i  $^{214}\text{Po}$ , od kojih se oba izotopa polonija raspadaju  $\alpha$  raspadom, a bizmut i olovo  $\beta$  i  $\gamma$  raspadom.

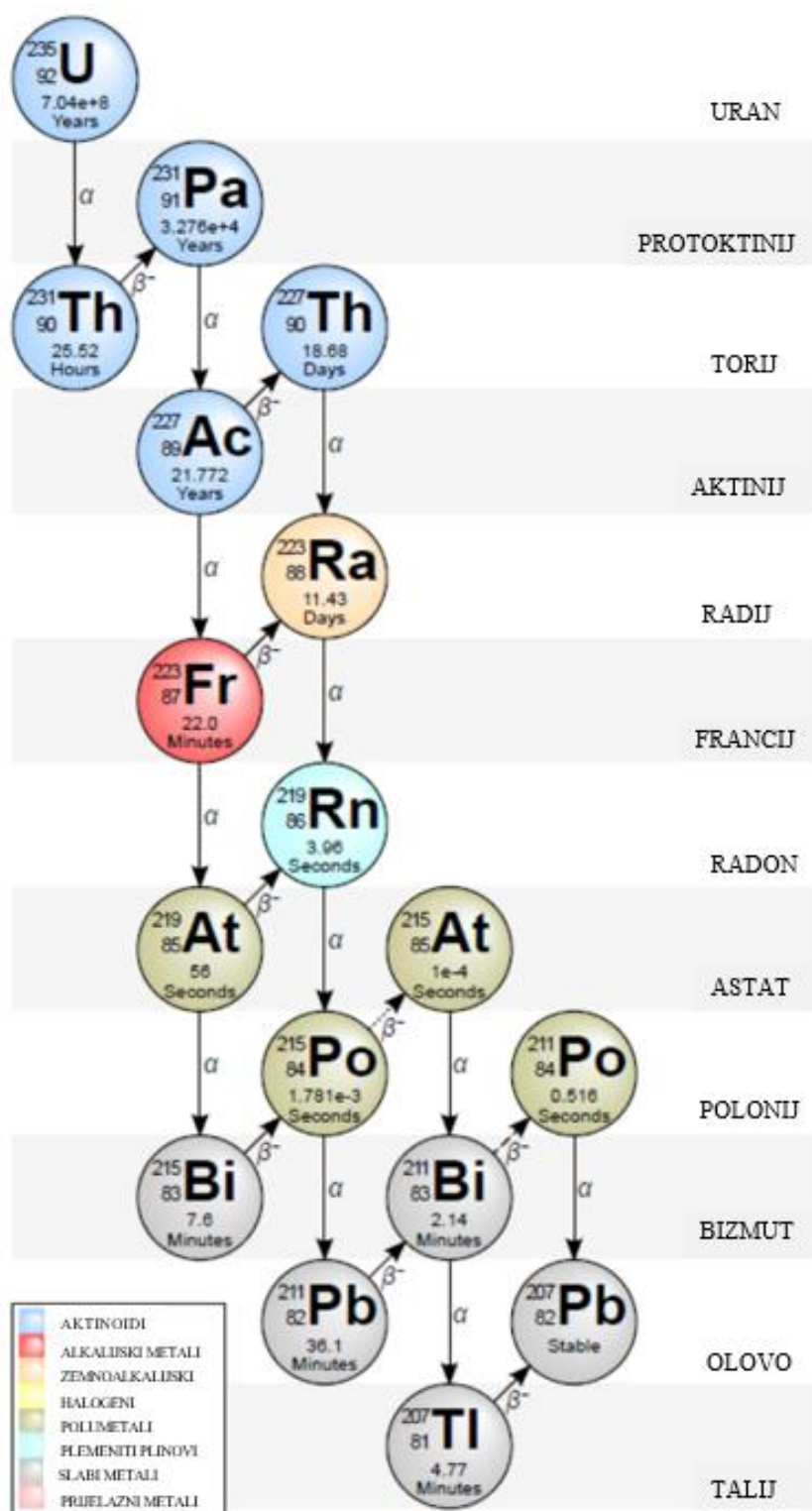
Drugi značajan izotop radona je  $^{220}\text{Rn}$  (toron), s vremenom poluraspada  $t_{1/2} = 55,6\text{s}$  i prosječnim vremenom života od  $\tau = 80,2$  s. Ovaj izotop nastaje u raspadnom nizu torija po kojemu i nosi ime. Slično kao i  $^{222}\text{Rn}$ , ima četiri kratkoživuća potomka:  $^{216}\text{Po}$ ,  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{212}\text{Bi}$  i  $^{212}\text{Po}$ . Zbog relativno kratkog vremena poluraspada, toron prevladuje puno kraću udaljenost nego radon.

Treći izotop je  $^{219}\text{Rn}$  (aktinon) s vremenom poluraspada  $t_{1/2} = 3,9$  s i prosječnim vremenom života  $\tau = 5,7$  s. Ime je dobio po aktinijevom raspadnom nizu, ali zbog kratkog vremena poluraspada te relativno male zastupljenosti u odnosu na ostale izotope, nije predmet općeg istraživanja.



Slika 8. Uranov raspadni niz [14]





Slika 9. Aktinijev raspadni niz [15]



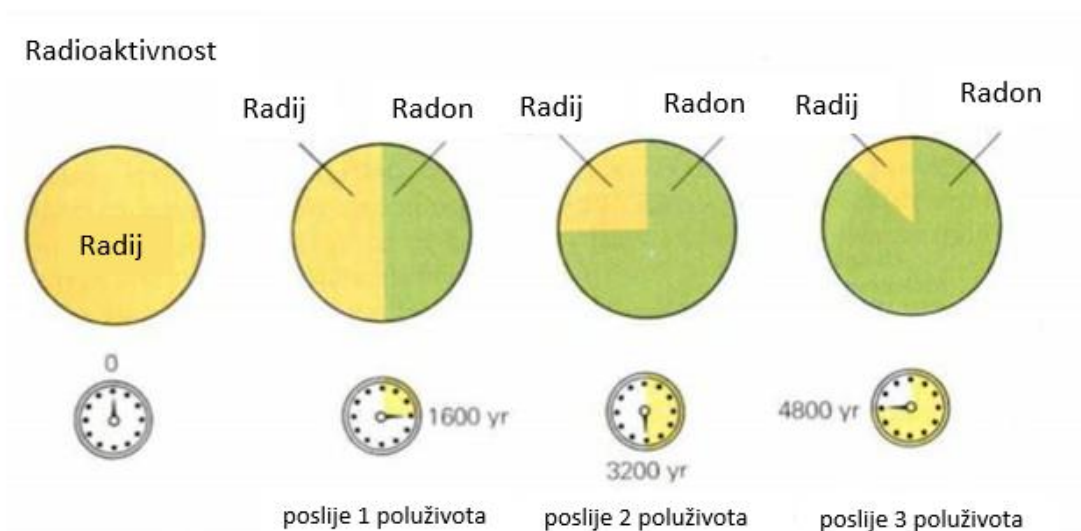
U Tablici 2. prikazana su pripadajuća vremena poluraspada izotopa radona, torona i aktinona kao i njihovih potomaka, tip radioaktivnog raspada te odgovarajuće energije emitiranih čestica pri radioaktivnom raspadu.

**Tablica 2.** Fizikalne karakteristike radona i njegovih kratkoživućih potomaka

RADIONUKLID	VRIJEME POLURASPADA	VRSTE ZRAČENJA I ENERGIJE (MeV)		
		$\alpha$	$\beta$	$\Gamma$
RADON				
$^{222}\text{Rn}$	3,825 d	5,4897		
$^{218}\text{Po}$	3,05 min	6,0026		
$^{214}\text{Pb}$	26,8 min		0,67; 0,73	0,2952; 0,3520
$^{214}\text{Bi}$	19,7 min		1,51; 1,54; 3,17; 3,27	
$^{214}\text{Po}$	163,7 $\mu\text{s}$	7,6869		
$^{210}\text{Pb}$	22,3 god		0,017; 0,061	
$^{210}\text{Bi}$	5,013 d		1,161	
$^{210}\text{Po}$	138,38 d	5,3044		
TORON				
$^{220}\text{Rn}$	55,6 d	6,2883		
$^{216}\text{Po}$	150 ms	6,7785		
$^{212}\text{Pb}$	10,64 h		0,331; 0,569	0,2386; 0,3001
$^{212}\text{Bi}$	60,6 min	6,0510; 6,0901	2,251	0,7271
$^{212}\text{Po}$	0,298 $\mu\text{s}$	8,7844		
$^{208}\text{Tl}$	3,053 min		1,796; 1,280; 1,520	0,5106; 0,5831; 2,6146
AKTINON				
$^{219}\text{Rn}$	3,96 s	6,4250; 6,5331; 6,8193		0,2711; 0,4017
$^{215}\text{Po}$	1,78 ms	7,3136		
$^{211}\text{Pb}$	36,1 min		1,38	0,4049; 0,4270; 0,8319
$^{211}\text{Bi}$	2,14 min	6,279; 6,623		
$^{207}\text{Tl}$	4,77 min		1,43	0,8972

Slika 10. prikazuje raspadanje radijevog izotopa  $^{226}_{88}\text{Ra}$ . Broj neraspadnutih atoma radija u uzorku smanjuje se za polovicu u periodu od svakih 1600 godina. Vremensko razdoblje (razmak) je prema tome poznat kao „poluživota“ radijuma. Alfa radij raspada se u radon izotop  $^{222}_{86}\text{Rn}$  čiji je vlastiti poluživot dug 3,8 dana. Poluživot radionuklida je period vremena potreban za pola početne količine nuklida da propadne. Kako vrijeme prolazi nepropadnuta količina postaje manja, a ostalo je još nešto za mnoge druge poluživote. Ako na početku izotop  $^{226}_{88}\text{Ra}$  sadrži jedan miligram radija, koji se raspada alfa raspadom na radon izotop  $^{222}_{86}\text{Rn}$  s poluživotom od prilike 1600 godina, 0,5 miligrama radija će ostati, dok će se ostatak pretvoriti u radon. Tijekom sljedećih 1600 godina, pola od 0,5 miligrama radija kojega je ostalo će se raspasti, a ostati će 0,25 miligrama. Nakon 4800 godina, tj. nakon 3 poluživota od 0,25 miligrama radija ostati će 0,125 miligrama. Čak i nakon 6 poluživota, više od 1% originalnog uzorka ostati će neraspadnuto.

Svaki radionuklid ima karakteristični i nepromjenjivi poluživot. Neki poluživoti su samo milijunti dijelovi sekunde dok su drugi milijarde godina. Primjerice, radon je alfa odašiljač poput njegovog roditelja radija, ali poluživot radona traje samo 3,8 dana umjesto 1600 godina. Jedan od najvećih problema s kojim se suočavaju nuklearne elektrane je odlaganje radioaktivnog otpada, budući da neki izotopi imaju dugo trajanje poluživota, npr. raspad neutrona određene radioaktivne jezgre ima poluživot od 14,5 minuta [10].



**Slika 10.** Raspadanje radij izotopa  $^{226}_{88}\text{Ra}$  [10]

## 2.5. Izvori radona u okolišu

Glavni izvor radona ( $^{222}\text{Rn}$ ) je tlo koje sadrži radij ( $^{226}\text{Ra}$ ) koji  $\alpha$  – raspadom daje plinoviti radon. Izotopi radona nastaju u mineralima radioaktivnim raspadom odgovarajućih izotopa radija, koji su sami produkti u nizovima uranija, aktinija i torija. Prisutnost radona u tlu i stijenama ovisi o količini i raspodjeli uranija u njima. Uran se u kamenitoj podlozi nalazi u mineralima poput kofinita  $[\text{U}(\text{SiO}_4)_{1-x}(\text{OH})_{4x}]$  i uraninita ( $\text{U}_3\text{O}_8$ ) ili apsorbiran u kristalne rešetke minerala poput cirkona ( $\text{ZrSiO}_4$ ), apatita ( $\text{Ca}_5(\text{F,Cl})(\text{PO}_4)_3$ ) i alanita  $[\text{H}(\text{Ca,Fe})(\text{Al,Fe})_3\text{Si}_3\text{O}_{13}]$ . Kofinit, uranit, cirkon, apatit i alanit otpuštaju uranij putem erozije. Mekani minerali u dodiru s vodom stvaraju čestice gline dok se čvrsti minerali (cirkon, monazit, titanit) povezuju u pješčane dijelove, što za posljedicu ima raznoliku razdiobu uranija u različitim vrstama tla, što utječe i na razdiobu potomaka u uranijevom nizu, od kojih je radon jedan od članova [16].

U Tablici 3. prikazane su tipične koncentracije radona na različitim mjestima na Zemljinoj površini. Radon ostaje čvrsto zarobljen unutar kristalne rešetke minerala do svog radioaktivnog raspada. No, manji dio ipak napušta kristalnu rešetku te vođen različitim transportnim mehanizmima prevaljuje put iz unutrašnjosti prema površini Zemlje.

**Tablica 3.** Tipične koncentracije  $^{222}\text{Rn}$  na različitim mjestima na Zemlji

Lokacija	Koncentracija (atom/cm <sup>3</sup> )
Zrak iznad oceana	0,4
Zrak neposredno iznad površine Zemlje	4
Tipična kuća	20
Plin u Zemlji	20 000
Unutrašnjost tipičnog minerala	500 000

Za kvantitativno opisivanje karakteristika tla koje utječu na iznos emanacije radona iz kristalne rešetke u pukotine u tlu, značajna su dva parametra: sadržaj radija u tlu i koeficijent emanacije:

- Sadržaj radija obično je zadan kao specifična aktivnost (Bq/kg). Tako izražen sadržaj radija ekvivalentan je iznosu ukupne „proizvodnje“ radona u tlu gdje 1

Bq/kg radija daje 1 atom  $\text{kg}^{-1} \text{s}^{-1}$  radona. Sadržaj radija u tlu prati i sadržaj radija u stijenama od kojih je tlo nastalo.

- Koeficijent emanacije, odnosno sposobnost radona da se odvoji, definira se kao omjer radona generiranog u kristalnoj rešetci koji napušta zrnca minerala i ukupnog nastalog radona u mineralu. Koeficijenti emanacije za različite vrste tla i zdrobljene stijene su u rasponu vrijednosti od 5 do 70 %; Tablica 4.

**Tablica 4.** Vrijednost koeficijenta emanacije za različite vrste tla i smrvljenih stijena

Vrste tla	Koeficijent emanacije, $e$ [%]
Šljunak	15 – 40
Pijesak	15 – 30
Glina	30 – 70
Smrvljene stijene (veličina čestica 1 – 8 mm)	5 – 15
Smrvljeni, uranom bogat granit (veličina čestica 1 – 8 mm)	15 – 30

Radon unutar zatvorenih prostorija potječe iz tla ispod kuće, građevinskih materijala od kojih je izgrađena kuća (posebno pojedine vrste betona) ili izvora vode u kućanstvu (radon se otapa u vodi, iz koje se u domaćinstvima oslobađa prilikom tuširanja i pranja). Od velike je važnosti vrsta tla ispod građevine: ukoliko se radi o tlu visoke propusnosti, poput pjeskovitog tla, radon se lako može kretati i time uzrokovati visoku koncentraciju radona unutar zatvorenih prostorija.

Prilikom istraživanja radona često se vodi geogeni radonski potencijal (parametar za radiološko ispitivanje tla) na temelju procjene permeabilnosti (propusnosti) tla i koncentracije radona u tlu – za vrijeme ispod  $300 \text{ kBq/m}^3$  označava se kao niski, od 30 do  $100 \text{ kBq/m}^3$  kao srednji, a za vrijednost preko  $100 \text{ kBq/m}^3$  visoki geogeni radonski potencijal [17].

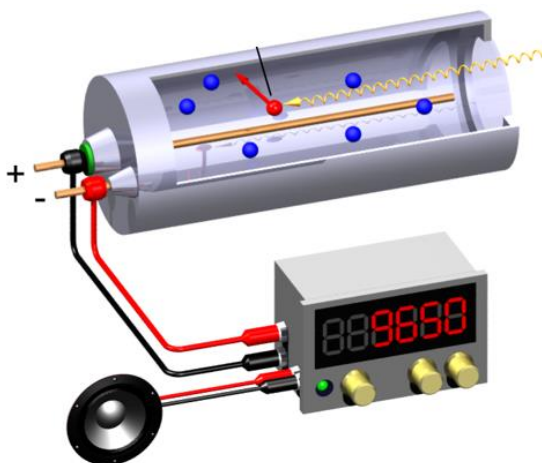
## 2.6. Načini mjerenja koncentracije radona

Postoje različite metode i tehnike za detekciju ionizirajućih zračenja. U svim mjernim tehnikama i metodama, posredno i neposredno, alfa, gama ili beta zračenje su detektirajući „fenomeni“. Kada se radi o radonu, mjerenje koncentracije radona može se obaviti neposredno mjerenjem koncentracije samog radona, ili indirektno, preko njegovih potomaka. Detekcija radona može se izvršiti mjerenjem nivoa alfa, beta i gama zračenja pomoću Geiger-Müllerovog brojača [18]. Koncentracija radona u zraku detektira se pomoću usisivanja određenog obujma zraka preko aerosolnog filtra iz kojeg se mjeri vrijeme poluraspada čestica radona koje su prisutne u zraku.

### 2.6.1. Mjerenje koncentracije radona u zraku

#### Geiger-Müllerov brojač

Geiger-Müllerov brojač mjerni je instrument za detekciju ionizirajućeg zračenja. Osnovni dio Geiger-Müllerovog brojača je metalna cijev s metalnom oblogom (Slika 11.), koja ima ulogu katode dok je anoda tanka metalna žica koja prolazi kroz os cijevi. Elektrode su spojene na visoki napon, a cijev je ispunjena smjesom plemenitog plina. Kada ionizirajuća čestica prolazi kroz metalnu cijev, dolazi do ionizacije plina. Produkti ionizacije (pozitivni ioni i elektroni) razdvajaju se pod djelovanjem električnog polja. Ioni se gibaju prema katodi, a elektroni prema anodi i pritom u plinu uzrokuju daljnju ionizaciju. Nakratko se zatvara strujni krug i na otporniku u vanjskom dijelu nastaje naponski impuls. Impulsi ionizirajućih čestica se odbrojavaju u električnom brojilu, koji često ima mali zvučnik za zvučnu indikaciju zračenja.

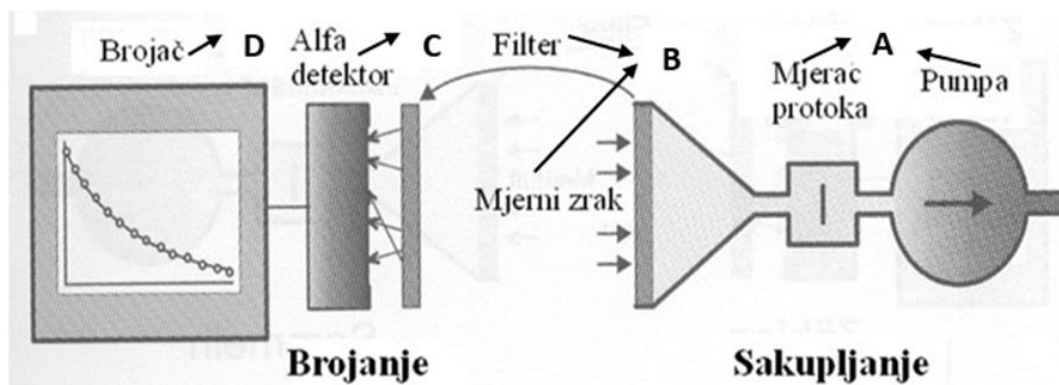


**Slika 11.** Presjek kroz Geiger-Müllerov brojač [19]

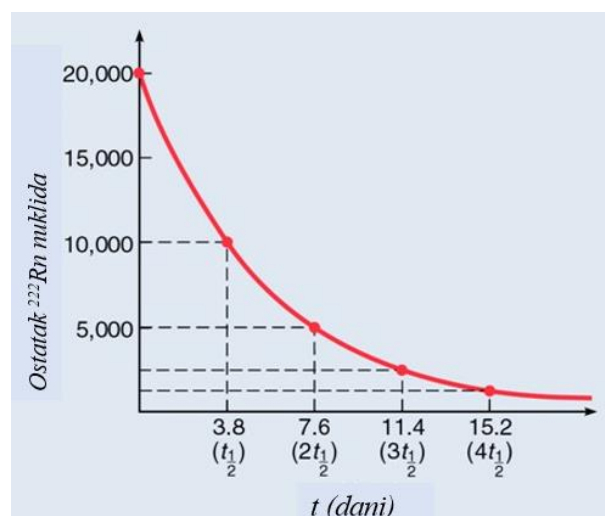
### Mjerenje radona u zraku

Uređaji za mjerenje produkata raspada radona u zraku rade na principu usisavanja zraka pomoću usisne pumpe preko aerosolnog filtera. Na Slici 12. [18] prikazan je jedan od mogućih načina mjerenja koncentracije radona u zraku:

- A. Usisavanje zraka određenog volumena pomoću usisne pumpe pri čemu se mjeri protok zraka
- B. Čestice zraka sakupljaju se na aerosolnom filteru. Na filteru se talože produkti raspada radona ( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ...), koji su sadržani u volumenu zraka koji je prošao kroz aerosolni filter. Nakon toga filter se uzima iz uređaja za sakupljanje i stavlja u uređaj za mjerenje aktivnosti radi određivanja aktivnosti alfa čestica.
- C. Alfa detektor (GM brojač) mjeri aktivnost raspada radona u zraku.
- D. Rezultat mjerenja je krivulja radioaktivnog raspada koja prikazuje smanjivanje broja čestica u vremenu. Tako dobivena krivulja odgovara krivulji radioaktivnog raspada radona iz koje se može detektirati o kojem se elementu radi (Slika 13).



**Slika 12.** Način mjerenja koncentracije radona [18]



**Slika 13.** Krivulja radioaktivnog raspada radona [20]

S obzirom na ukupni volumen protoka zraka, rezultati mjerenja produkata raspada daju koncentracije pojedinih produkata raspada u zraku u  $\text{Bq/m}^3$  ili potencijalne koncentracije alfa energije u  $\text{J/m}^3$ ,  $\text{MeV/cm}^3$ . Radi bolje usporedbe s koncentracijama radona, često se navodi potencijalna koncentracija alfa-energije u obliku ravnotežne-ekvivalentne koncentracije (*equilibrium equivalent concentration, EEC*) u  $\text{Bq/m}^3$  ( $1\text{J/m}^3 = 1,8 \cdot 10^8 \text{ Bq/m}^3$ ).

Ispitivanje osjetljivosti mjernog uređaja između ostalog ovisi i o protoku zraka, odnosno o snazi usisne pumpe. Najčešće se primjenjuju protoci zraka između  $0,1 \text{ m}^3/\text{h}$  i  $1 \text{ m}^3/\text{h}$ . Uređaji za mjerenje većih koncentracija mogu raditi i s protokom zraka od  $0,05 \text{ m}^3/\text{h}$ . Osjetljiva kratko vremenska mjerenja zahtijevaju tzv. uzorak velike zapremnine s protokom zraka od  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  do  $100 \text{ m}^3/\text{h}$ . Glavni problem kod ovih mjerenja su greške pri uzimanju uzoraka, a često se produkti raspada i izgube dok se odvajaju u okolini uređaja ili u uskim prolazima zraka [18]. Pri protoku zraka od  $1000 \text{ l/h}$  i vremenu sakupljanja od  $5 \text{ min}$ , mjerna osjetljivost iznosi  $30 \text{ Bq/m}^3$ .

## 2.6.2. Mjerenje koncentracije radona u vodi i tlu

### RAD 7 uređaj

RAD7(Slika 14.) je uređaj koji se može koristiti za mjerenje koncentracije radona u vodi, zraku i zemlji. Zahvaljujući baterijskom napajanju i kompaktnom dizajnu, uređaj je moguće koristiti na terenu ili u laboratorija. Upravo ta mogućnost korištenja uređaja daje prednost za mjerenje koncentracije radona na licu mjesta [21].



**Slika 14.** Alfa spektrometar DURRIDGE RAD7 [21]

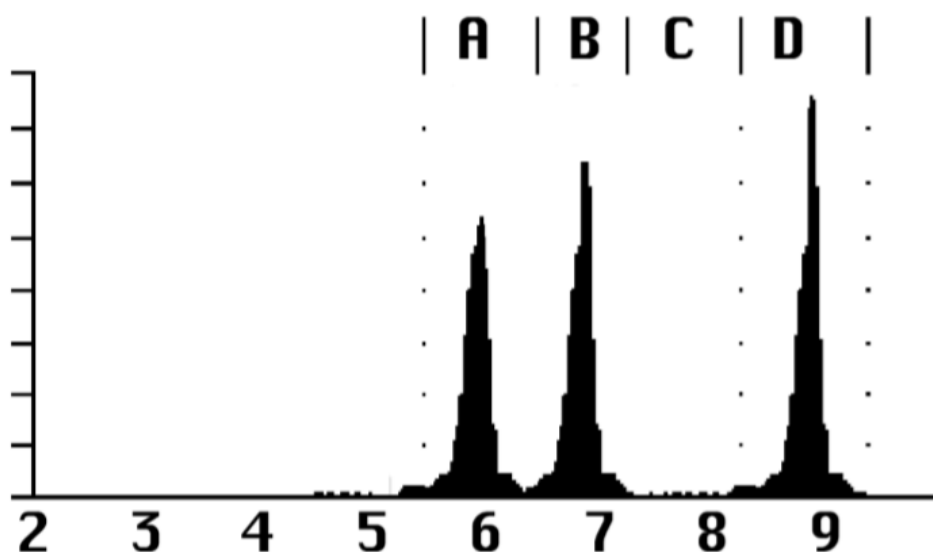
Središnji dio sustava je polusferna komora zapremnine 0,7 litara koja je sa unutarnje strane obložena materijalom koji je dobar električni vodič. U središtu polusfere nalazi se silicijski  $\alpha$  detektor. Visoki napon održava stalnu razliku potencijala od 2 kV do 2,5 kV stvarajući električno polje unutar detektorske komore, koja usmjerava pozitivno nabijene čestice prema površini silicijskog detektora. Automatska pumpa omogućava protok suhog zraka brzinom 1 l/min kroz komoru [18].

Na ulazu u komoru nalazi se filter koji sprečava ulazak radonovih potomaka u komoru i time omogućava mjerenje samo koncentracije radona u komori dok njegovi potomci ostaju nataloženi na filteru. Jezgre radona  $^{222}\text{Rn}$ , koje se nalaze unutar komore, raspadaju se na jezgre polonija, kao i naostale produkte raspada, npr.  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Po}$  i slično (Tablica 2.). Npr. nataloženi polonij raspada se  $\alpha$  i  $\beta$  raspadom, a  $\alpha$  čestice se detektiraju točno određenom energijom  $\alpha$  čestice koja nastaje raspadom polonija  $^{218}\text{Po}$  i iznosi 6,03 MeV. Svi ostali  $\alpha$  raspad i će se detektirati s drugom upadnom energijom, a raspad nastali  $\beta$  raspadom neće se detektirati. Alfa čestice nastale raspadom  $^{222}\text{Rn}$  u zraku unutar komore također se neće detektirati jer su nastale u zraku, a ne na površini detektora. Naime, na površini detektora se ne talože atomi radona jer su kemijski inertni i električki neutralni pa ne mogu biti privučeni električnim poljima.

Prednost uređaja RAD7 je i njegova mogućnost preciznog prikazivanja alfa spektra. To je omogućeno odvajanjem izmjerenih energija u osam „prozora“ od kojih svaki takav „prozor“ pokriva točno određene energijske nivoe. Na Slici 15. prikazana je ovisnost brojnosti čestica njihovoj energiji (Tablica 2): u „prozoru“ A prikazana je energija koja iznosi 6,00 MeV, a radionuklid je  $^{218}\text{Po}$  i  $^{212}\text{Bi}$ ; u „prozoru“ B prikazana je energija koja iznosi 6,78 MeV, a radionuklid je  $^{216}\text{Po}$ ; u „prozoru“ C prikazana je energija koja iznosi 7,69 MeV, a radionuklid je  $^{214}\text{Po}$ ; u „prozoru“ D prikazana je energija 8,78 MeV, a radionuklid je  $^{212}\text{Po}$  [21].

RAD7 ima mogućnost pohrane izmjerenih podataka koji se čuvaju u internoj memoriji uređaja do kraja mjerenja. Na ispisanom izvještaju nalaze se, između ostalog, i sljedeće informacije: datum i vrijeme, srednja koncentracija aktivnosti radona za dani period mjerenja, standardna devijacija srednje koncentracije, najveća izmjerena vrijednost, najmanja izmjerena vrijednost, histogram srednjih koncentracija po zadanim ciklusima i kumulativni alfa spektar.





**Slika 15.** Primjer alfa spektra radona i njegovih kratkoživućih potomaka dobivenih mjerenjem pomoću uređaja RAD7 [21]

#### RAD-H<sub>2</sub>O uređaj

Za mjerenje koncentracije radona u vodi, uz osnovni uređaj RAD7, potrebni su i posebni dodaci koji omogućavaju takvu vrstu mjerenja (Slika 16.). RAD-H<sub>2</sub>O metoda koristi zatvorenu petlju kojom struji zrak pomiješan s vodom gdje su volumen zraka i volumen vode konstantni. Zrak kontinuirano kruži kroz vodu i ekstrahira radon, iz kojeg se određuje koncentracija radona na isti način kao na Slici 15.



**Slika 16.** Uređaj RAD7 s dodacima za mjerenje radona u vodi [21]

Neki od faktora koji utječu na točnost mjerenja radona u vodi su:

- tehnika uzimanja uzoraka vode
- koncentracija uzoraka
- veličina uzoraka
- vrijeme mjerenja
- temperatura
- relativna vlažnost
- pozadinski efekt.

RAD-H<sub>2</sub>O omogućuje mjerenje koncentracije radona u vodi manje od 0,37 Bq/l do koncentracija većih od  $0,15 \cdot 10^5$  Bq/l[21].

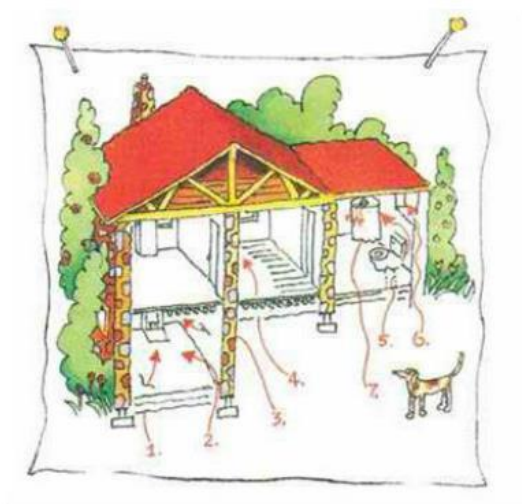
### 3. ŠTETNI UTJECAJI RADONA NA LJUDSKO ZDRAVLJE

#### 3.1. Radon u kućama (zatvoreni prostor)

Radon može doprijeti u kuće iz raznih izvora i na razne načine (Slika 17). Koncentraciji radona u kućama najviše pridonosi tlo iz kojeg radon može izaći kroz veće otvore u temeljima kuća. Budući da radon konstantno izlazi iz tla, uvijek je prisutan u zraku, ali u određenim okolnostima koncentracija u prostoriji može biti značajno veća od normalne koncentracije u zraku. Većina zgrada i prostorija ima ograničen prostor s ograničenim kretanjima zraka i sporom izmjenom vanjskog zraka. Kad radon jednom uđe u prostoriju, dolazi do njegovog raspada i povećanja koncentracije produkata tog raspada. Koncentracija radona najčešće je najveća u podrumu i prizemlju zbog direktnog dodira s temeljnim tlom, koncentracija na katu je upola manja dok je iznad prvog kata obično zanemariva. Mogući putovi ulaska radona u unutrašnjost kuće su kroz pukotine u podu, nosive betonske grede, pukotine na zidu, pukotine na podu zatvorene terase, vodovodnom i kanalizacijskom infrastrukturu [3].

#### Načini ulaska radona u kuću

1. Pukotine na podu
2. Poprečna greda
3. Pukotine na zidu
4. Pukotine na podu zatvorenog balkona
5. Pukotine oko odvodnih cijevi
6. Udubljenje u zidu
7. Vodovodom



**Slika 17.** Mehanizam prodiranja radona u stambeni objekt [22]

Nakon gradnje se tlo ispod kuće malo slegne i ostane prazan prostor između temelja kuće i površine zemlje te se u tom prostoru sakuplja radon. Da bi se spriječilo prodiranje radona u građevinu, treba zatvoriti putove ulaska u kuću. Ukoliko je kuća kvalitetno napravljena i nema ni najmanjih pukotina u temeljima i zidovima uz kvalitetnu hidroizolaciju, radon ne može prodrijeti u kuću[23]. Ako se mjerenjima utvrde povišene vrijednosti koncentracije radona u kući, potrebno je sustavom ventilacijskih cijevi ukloniti prisutnost radona iz stambenog prostora. Suvremeni sustavi prozračivanja niskoenergetskih objekata pokazali su se vrlo djelotvornim u suzbijanju pojave radona u zraku stambenog prostora.

Intervencijske mjere za smanjenje razine radona mogu biti pasivne i aktivne:

**PASIVNE:**

- ugradnja zaštitne nepropusne membrane
- temeljito brtvljenje podzemnog dijela kuće, što uključuje pažljivo zatvaranje svih pukotina i ugradnju nepropusnih manšeta na sve prodore cijevi i instalacija kroz zid.

**AKTIVNE:**

- ugradnja dodatne ventilacije i ventilatora koji stvara podtlak u prostorijama s povećanom koncentracijom radona.

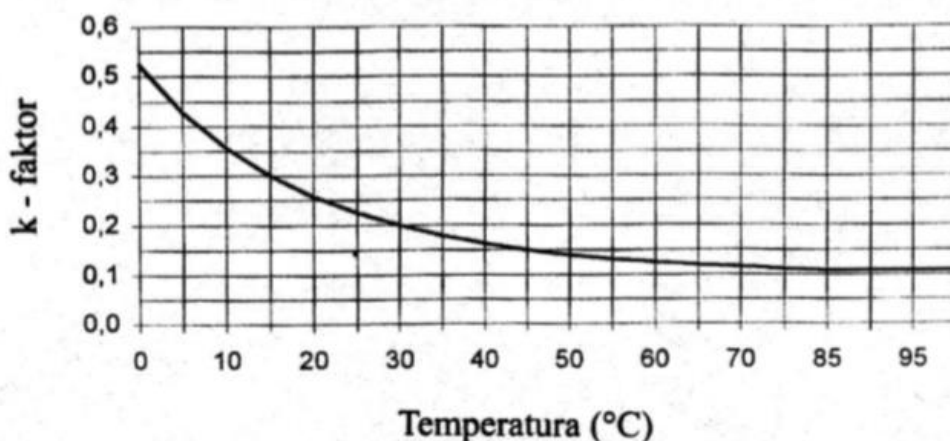
Prosječna koncentracija radona u stambenim prostorima u svijetu je oko 50 Bq/m<sup>3</sup>, a na otvorenom prostoru iznosi oko 15 Bq/m<sup>3</sup>. Komisija Europske Unije (*The Commission Of The European Communities*) odlukom 90/143/Euroatom iz 1990. godine preporuča srednje godišnje koncentracije radona u zraku i kućama: 400 Bq/m<sup>3</sup> za starogradnju i 200 Bq/m<sup>3</sup> za novogradnju. Iznad tih vrijednosti opravdano je započeti poduzimanje protumjera za smanjenje koncentracije radona[24]. U Hrvatskoj trenutno nema propisane zakonske regulative koja se odnosi na koncentracije radona i mjere smanjenja radona, ali ulaskom u Europsku Uniju potrebno je prihvatiti njihove preporuke. Srednja vrijednost radonske koncentracije u zraku u hrvatskim kućanstvima iznosi 64 Bq/m<sup>3</sup> (minimum 4 Bq/m<sup>3</sup>, a maksimum 751 Bq/m<sup>3</sup>) [25].

### **3.2. Radon u vodi**

Osim u tlu, radon se nalazi i u podzemnim, površinskim i otpadnim vodama. Podzemne vode sadrže znatno veće koncentracije radona nego površinske vode poput jezera, potoka i rijeka dok u vodi za piće može biti prisutan otopljeni radon.

Koncentracije radona u vodi vrlo su promjenjive, a uglavnom ovise litologiji stijenske stanice vodonosnika i različitim procesima na putu prema potrošaču (otplinjavanje, razrjeđivanje, propadanje). Uslijed direktnog kontakta s određenim mineralima stijena, prirodna i izvorska voda mogu sadržavati veće koncentracije radona. Direktnim konzumiranjem takve vode dolazi do ingestije radona (od pitke vode) i inhalacije radona direktnim udisanjem para bogatim radonom.

U plinovitom stanju, radon je srednje topljiv u vodi. Pod djelovanjem Van der Waalsovih sila tvori metastabilne strukture, klatrate ( $Rn \cdot 6H_2O$ ) u kojima je atom radona polariziran djelovanjem jakog dipolnog momenta vode. Razina otopljenosti radona ovisi o pH vrijednosti i temperaturi vode [26, 27]. Više pH vrijednosti ( $pH > 7$ ) razaraju klatrate čime se radon vraća u plinovitu fazu. Ovisnost k – faktora, tj. omjera radona otopljenog u vodi i u plinovitoj fazi o temperaturi prikazana je na Slici 18.



**Slika 18.** Ovisnost k-faktora radona o temperaturi

### 3.3. Efektivne godišnje doze radona za ljude

Prilikom proučavanja radioaktivnog raspada važno je istražiti utjecaj vrste zračenja na različite tvari, poglavito ljudsko tkivo. Različiti materijali će se razlikovati u mjeri apsorpcije ionizirajućeg zračenja.

**Apsorbirana doza** (oznaka  $D$ ) je fizikalna veličina koja se definira kao omjer srednje energije  $d\bar{\epsilon}$  ionizirajućeg zračenja elementa volumena  $V$  i mase tvari  $dm$  u tom volumenu:

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (7)$$

Apsorbirana doza definira energiju ionizirajućeg zračenja prenesenu na materijal ili tvar na kojeg djeluje po jedinici mase. SI mjerna jedinica za apsorbiranu dozu je  $Jkg^{-1}$  i naziva se **grej (Gy)**. Prije uvođenja SI jedinica, jedinica za apsorbiranu dozu bila je *RAD (Radiation Adsorber Dose)*, a njihov međuođnos je:

$$1Gy = 100RAD \quad (8)$$

Također je potrebno kvantificirati različiti utjecaj zračenja na ljudsko tkivo. U tu svrhu koristi se relativnabiološka učinkovitost (*RBE*), kao omjer doze određenog zračenja i doze x-zračenja za iste biološke učinke.

**Težinska doza zračenja (Ekvivalentna doza), ( $H_T$ )** je suma srednjih apsorbiranih doza koje potječu od zračenja  $R$  u organu ili tkivu  $T$  pomnožena s težinskim faktorima zračenja  $w_R$ :

$$H_T = \sum_R w_R * D_{T,R} \quad (9)$$

SI mjerna jedinica za ekvivalentnu dozu je  $Jkg^{-1}$ , ali ima poseban naziv: **sivert (Sv)**. Starija mjerna jedinica je rem (*roentgen equivalent man*), ako je  $D$  izražen u radima. Težinski faktor  $w_R$  izračunava se iz energije koju određena vrsta zračenja prenese po jedinici dužine. Težinska doza zračenja ne uzima u obzir vrstu tkiva na koje utječe zračenje. Različita tkiva ili organi različito reagiraju na zračenje te se uvođenjem težinskih faktora tkiva, koji održavaju relativni rizik od nastanka karcinoma ili različitih bolesti, definira nova dozimetrijska veličinu, efektivna doza.

**Efektivna doza, ( $E$ )** je suma težinskih doza zračenja  $H_T$  u svim organima i tkivima  $T$  pomnožena s težinskim faktorom tkiva  $w_T$ :

$$E = \sum_T w_T * H_T = \sum_T w_T * w_R * D_{T,R} \quad (10)$$

SI mjerna jedinica za efektivnu dozu je **sivert (Sv)**. Vrijednosti težinskih faktora za pojedine organe i tkiva ljudskog tijela prikazane su u Tablici 5.

**Tablica 5.** Težinski faktori tkiva  $w_T$ 

Tkivo ili organ	Težinski faktori tkiva $w_T$		
	ICRP, 1977.	ICRP, 1991.	ICRP, 2006.
<b>Gonade</b>	0,25	0,20	0,08
<b>Koštana srž (crvena)</b>	0,12	0,12	0,12
<b>Debelo crijevo</b>		0,12	0,12
<b>Pluća</b>	0,12	0,12	0,12
<b>Želudac</b>		0,12	0,12
<b>Mjehur</b>		0,05	0,05
<b>Grudi</b>	0,15	0,05	0,08
<b>Jetra</b>		0,05	0,05
<b>Jednjak</b>		0,05	0,05
<b>Štitna žlijezda</b>	0,03	0,05	0,05
<b>Koža</b>		0,01	0,01
<b>Površina kosti</b>	0,03	0,01	0,01
<b>Ostatak</b>	0,30	0,05	0,12
<b>UKUPNO:</b>	1,00	1,00	1,00

Tijekom života, čovjek je izložen prirodnoj radioaktivnosti. Prosječna efektivna doza po stanovniku iznosi 2,4 mSv godišnje, no raspon vrijednosti individualnih doza je promjenjiv. Tako se za oko 65% populacije očekuje raspon vrijednosti od 1 do 3 mSv, oko 25% populacije primit će manju dozu od 1 mSv, a samo oko 10% populacije primit će dozu preko 3 mSv [28].

### 3.4. Radon i ljudsko zdravlje

Radon i njegovi kratkoživi potomci daju najveći doprinos zračenja koje čovjek primi iz prirodnih izvora i to preko 50%. Povećane koncentracije radona u prostorijama u kojima ljudi svakodnevno borave mogu iznimno negativno djelovati po zdravlje čovjeka u vidu povećanja rizika od nastanka različitih karcinoma. Radon je moguće unijeti u tijelo na dva načina: kroz pluća i kroz probavni sustav.

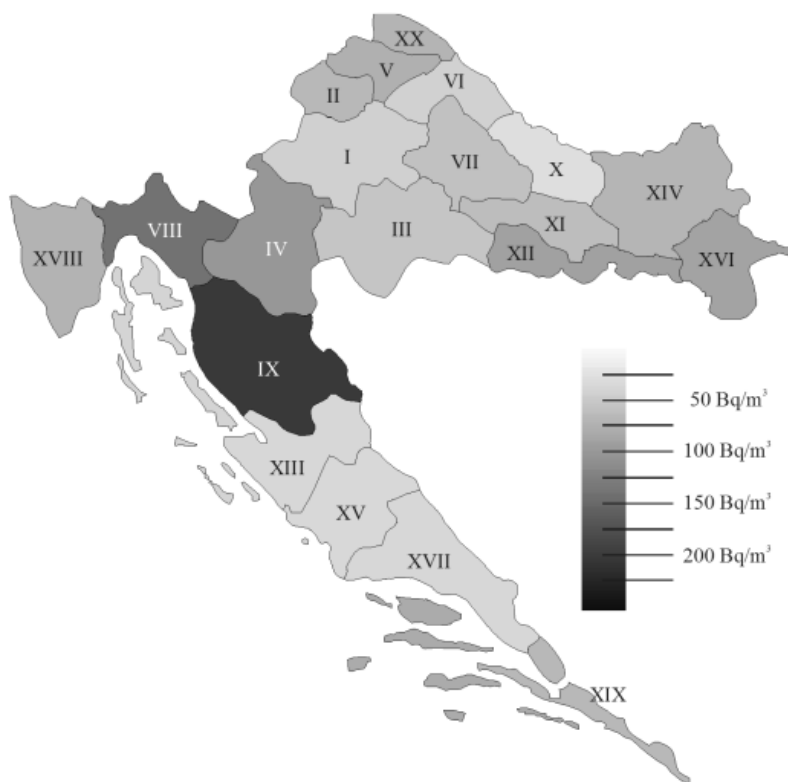
Radon se nakuplja u zatvorenim prostorijama, poput kuća ili podruma u koji ulazi difundiranjem (rasprostranjivanjem) izravno iz tla ili u prostoriju ulazi izravno iz zidova (zbog tragova urana u građevinskim materijalima). Udisanjem se neizbježno udiše i radon, koji se u plućima raspada te zbog velike energije oslobođene pri raspadu oštećuje stanice plućnog tkiva. Zbog relativno dugog vremena poluživota radona, vjerojatnost raspadanja u plućima je mala, no kod dovoljno visokih koncentracija radona, mogućnost izravnog raspadanja radona nije zanemariva. Puno veći doprinos imaju radonovi potomci u raspadnom nizu:  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  i  $^{214}\text{Po}$  koji se nakon raspadanja radona unutar prostorije vežu za sitne čestice u zraku (aerosole) te udisanjem dospijevaju u pluća gdje se talože i raspadaju. Količina zračenja koja se primi od radona i njegovih potomaka ovisi i o veličini i koncentraciji aerosola u boravišnim prostorima. Dobra ventilacija i provjetravanje prostorija u kojima borave ljudi, smanjuje koncentraciju radona i njegovih potomaka u zraku.

Za pojedinca koji je tijekom života izložen zračenju radona i njegovih potomaka od 1 mSv/godišnje, rizik od smrti uslijed raka pluća povećava se za 0,1%. Prosječne vrijednosti koncentracija radona unutar zatvorenih prostorija u europskim i sjeverno američkim zemljama iznose od 20 do 60 Bq/m<sup>3</sup> te boravak u takvim uvjetima, povećava rizik raka pluća od 0,1 do 0,5 % [29].



## 4. RADON U REPUBLICI HRVATSKOJ

Prema istraživanjima između 2003.i 2005. godine, slučajnim izborom lokacija u Hrvatskoj postavljeno je 1000 detektora radona u stambenim objektima. Nakon jednogodišnjeg mjerenja, 790 detektora vraćeno je u obradu i analizu. Prosječne izmjerene vrijednosti radona u kućama iznose  $68 \pm 85 \text{ Bq/m}^3$  (aritmetička sredina s pripadajućom standardnom devijacijom) odnosno  $50,0 \pm 2,3 \text{ Bq/m}^3$  (geometrijska sredina s pripadajućom geometrijskom standardnom devijacijom). U oko 3% kuća u RH-oj izmjerene su vrijednost koncentracije radona veće od  $300 \text{ Bq/m}^3$ . Prosječne vrijednosti koncentracije radona po županijama iznosile su 33 –  $198 \text{ Bq/m}^3$  (najviša u Ličko-senjskoj županiji) [2]. U Hrvatskoj postoje detaljne karte koje opisuju raspodjelu koncentracije radona u naseljenim mjestima(Slika 19.).



**Slika 19.** Prikaz raspodjele koncentracije radona u RH-oj.

U nekim županijama Republike Hrvatske zabilježeno je povećanje koncentracija radona te su provedena detaljnija istraživanja. U Osječko-baranjskoj županiji provedena su mjerenja radona u vodi gradskih vodovoda i bunara. Izmjerene vrijednosti koncentracija radona iznosile su u gradskom vodovodu od 0,6 do  $15,9 \text{ Bq/L}$  sa srednjom

vrijednosti 4,55 Bq/L i pripadnom standardnom devijacijom 3,63 Bq/L, dok su u bunarima iznosile od 4,0 do 17,4 Bq/L s aritmetičkom sredinom 9,48 Bq/L i pripadnom standardnom devijacijom 3,26 Bq/L. Prosječna godišnja efektivna doza koju primi stanovnik Osječko-baranjske županije unosom pitke vode iz gradskih vodovoda i bunara iznosi 24,2  $\mu$ Sv/god dok prosječna godišnja efektivna doza inhalacijom radona iznosi 2,04 mSv/god [30].

Petomjesečna mjerenja koncentracije radona tijekom 2003. i 2004. godine u stambenim objektima Vukovarsko-srijemske županije obuhvatilo je 5 gradova i 25 općina. Izmjerene vrijednosti su od 18 do 548 Bq/m<sup>3</sup>, s aritmetičkom sredinom od 95 Bq/m<sup>3</sup>, a s geometrijskom sredinom od 74 Bq/m<sup>3</sup>. Postotak stambenih objekata u kojima je koncentracija radona iznad 200 odnosno 400 Bq/m<sup>3</sup> iznosi 8,7% odnosno 1,4%. Srednji godišnji efektivni dozni ekvivalent koji potječe od radona i njegovih kratkoživićih potomaka za stanovnike Vukovarsko-srijemske županije iznosi 2,4 mSv [31].

U rujnu 2012. godine provedena su mjerenja koncentracije radona u tlu i vodi u naseljima Ličko-senjske županije. Izmjerene vrijednosti koncentracije radona u tlu na 19 lokacija bile su u rasponu od 12,6 do 258,7 kBq/m<sup>3</sup>, sa srednjom vrijednosti od 83,5 kBq/m<sup>3</sup> i pripadnom standardnom devijacijom 69,3 kBq/m<sup>3</sup>. Iako dobivena prosječna vrijednost radona u tlu svrstava tla Ličko-senjske županije među tla srednjeg geogenskog radonskog potencijala, na trećini izmjerenih lokacija radonska vrijednost premašuje 100 Bq/m<sup>3</sup> te predstavlja područje visokog geogenskog radonskog potencijala. Koncentracija radona u vodi gradskih vodovoda Ličko-senjske županije bile su u rasponu od 0,2 Bq/L do 11,2 Bq/L. Najviša vrijednost je 10-tak puta niža od uobičajene referentne vrijednosti od 100 Bq/L. Procijenjena maksimalna godišnja radonska doza primljena unosom pitke vode iz gradskih vodovoda iznosi 2,9  $\mu$ Sv [32].

Jednogodišnja mjerenja koncentracije radona provedena tijekom 2004. godine u Međimurskoj županiji obuhvatila su 3 grada i 22 općine. Na području Međimurske županije utvrđena je srednja vrijednost koncentracije radona od 79 Bq/m<sup>3</sup> sa standardnom devijacijom od 66 Bq/m<sup>3</sup> te geometrijskom sredinom od 61,0 Bq/m<sup>3</sup>. Najniža koncentracija radona iznosila je 11 Bq/m<sup>3</sup>, a najviša koncentracija iznosila je 528 Bq/m<sup>3</sup>. Srednji godišnji efektivni dozni ekvivalent koji stanovništvo Međimurske županije primi od radona i njegovih kratkoživićih potomaka iznosi 2,09 mSv [3].

## 5. ZAKLJUČAK

Radon je 86-ti element periodnog sustava, plemeniti plin bez boje, mirisa i okusa, atomske mase 222. Tri izotopa radona prirodno su radioaktivna i nastaju prirodno u tlu, a to su  $^{222}\text{Rn}$  (radon),  $^{220}\text{Rn}$  (toron),  $^{219}\text{Rn}$  (aktinon). Radon  $^{222}\text{Ra}$  ima vrijeme poluživota od 3,825 dana u usporedbi s kratkim vremenima poluživota  $^{220}\text{Rn}$  od 55,6 s i  $^{219}\text{Rn}$  od 3,96 s.

Radon je u određenim koncentracijama prisutan u gotovo svim stambenim objektima, lako prolazi kroz pijesak i porozne materijale, kroz pukotine u Zemljinoj kori i stijenama te kroz elemente stambenih zgrada. Koncentracija radona ovisi o vrsti materijala i sastavu tla a najveća je u granitu, vulkanskom kamenju i bazaltu.

Potomci radona vežu se na čestice prašine i dima te se unosom u dišni sustav talože i nakupljaju u plućima što može dovesti do pojave teških oboljenja. Kontinuiranim mjerenjima koncentracije radona u okolišu (zrak, voda, tlo, stambeni prostor) moguće je spriječiti izravan unos visokih koncentracija radona u organizam.

## 6. LITERATURA

- [1] Pavlačić A., Mjerenje radona na sveučilištu u Osijeku i veleučilištima u Slavoniji/diplomski rad, Osijek: Sveučilište Josipa Juraja Strossmayera u Osijeku, odjel za fiziku, 2015., str.9
- [2] Dostupno na: <http://radon.dzrns.hr/o-radonu/>. Datum pristupa: 4.04.2018.
- [3] Bajkovec J., Radon u kućama u Međimurskoj županiji/ diplomski rad, Osijek:Sveučilište Josipa Juraja Strossmayera u Osijeku, odjel za fiziku, 2015., str: 2,5, 47
- [4] Slika prodornosti  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  čestica. Dostupno na:<http://radioaktivniotpad.org/radioaktivnost/>.Datum pristupa: 20.06.2018.
- [5]Slika  $\alpha$ -raspad. Dostupno na: <https://nemesi96.weebly.com/alfa-raspad.html>. Datum pristupa: 4.06.2018.
- [6] Slika  $\beta$ -raspad. Dostupno na: <https://sites.google.com/site/lukalorenivan/radiacija>. Datum pristupa: 4.06.2018.
- [7] Slika  $\gamma$ -raspad. Dostupno na: <https://www.slideserve.com/tallys/nuklearna-fizika>. Datum pristupa: 4.06.2018.
- [8] Dostupno na: <https://www.slideserve.com/Olivia/nuklearna-fizika-1236351>. Datum pristupa: 9.05.2018.
- [9] Slika krivulja radioaktivnog raspada i vrijeme poluraspada atomske jezgre. Dostupno na:<http://radioaktivniotpad.org/radioaktivnost/>. Datum pristupa: 12.06.2018.
- [10] Krauskopf Konard B., Beiser Arthur: The physical universe. str. 298 – 301
- [11] Slika spektar elektromagnetskog zračenja. Dostupno na: [http://www.mego-n.net/docs/1\\_tko\\_to\\_tamo\\_zraci/tko\\_to\\_tamo\\_zraci\\_glavna%20.htm](http://www.mego-n.net/docs/1_tko_to_tamo_zraci/tko_to_tamo_zraci_glavna%20.htm). Datum pristupa: 28.06.2018.
- [12] Slika lanac radioaktivnog raspada  $^{238}\text{U}$ . Dostupno na: <http://www.agreenroadjournal.com/2013/10/uranium-238-decay-chain-and-negative.html>.Datum pristupa: 4.06.2018.

- [13] Tablica radioaktivni raspadni nizovi. Dostupno na: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=51474>. Datum pristupa: 4.06.2018.
- [14] Slika uranov raspadni niz. Dostupno na: <http://metadata.berkeley.edu/nuclear-forensics/Decay%20Chains.html>. Datum pristupa: 4.06.2018.
- [15] Slika aktinijev raspadni niz. Dostupno na: <http://metadata.berkeley.edu/nuclear-forensics/Decay%20Chains.html>. Datum pristupa: 4.06.2018.
- [16] Radolić V., Mjerenje radona i radonovih potomaka u zraku pri različitim koncentracijama aerosola/ magistarski rad, Zagreb: Prirodoslovni-matematički fakultet, 3.03.2000., 100 str
- [17] Kemski, J.; Siehl, A.; Stegemann, R.; Valdivia-Manchego M. Mapping the geogenic radon potential in Germany.// The Science of the Total Environment. 272, 2001; 217-230.
- [18] Mr. Trešnjo Z., dr. Adrović F.; Tehnike mjerenja produkata raspada radona u zraku // 4. Naučno stručni skup sa međunarodnim učešćem „KVALITET 2005.“, Fojnica, BiH, 09.-12.11.2005., str: 363-366
- [19] Slika presjek kroz Geiger-Müllerov brojač. Dostupno na: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Geigerov\\_broja%C4%8D#/media/File:Geiger-Muller-counter-en.png](https://hr.wikipedia.org/wiki/Geigerov_broja%C4%8D#/media/File:Geiger-Muller-counter-en.png). Datum pristupa: 28.06.2018.
- [20] Slika krivulja radioaktivnog raspada radona. Dostupno na: <https://slideplayer.com/slide/6407915/>. Datum pristupa: 28.06.2018.
- [21] Uređaj RAD7.
- Dostupno na: <https://durridge.com/documentation/RAD7%20Manual.pdf>. Datum pristupa: 5.06.2018.
- [22] Slika mehanizam prodiranja radona u stambeni objekt. Dostupno na: [https://www.google.hr/search?q=na%C4%8Din+ulaska+radona+u+ku%C4%87u&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiBh7HN6cTbAhVSh6YKHXdpBsAQ\\_AUI\\_CigB&biw=1366&bih=662#imgsrc=grGbAbredlzUMM:](https://www.google.hr/search?q=na%C4%8Din+ulaska+radona+u+ku%C4%87u&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiBh7HN6cTbAhVSh6YKHXdpBsAQ_AUI_CigB&biw=1366&bih=662#imgsrc=grGbAbredlzUMM:). Datum pristupa: 9.05.2018.
- [23] Način ulaska radona u kuću. Dostupno na: <https://www.slideserve.com/kaipo/radon-i-radioaktivnost>. Datum pristupa: 9.05.2018.

- [24] International Commission on Radiological Protection (ICRP), 1994. Protection against Radon-222 at home and at work. In: ICRP Publication, vol. 65. Pergamon Press, Oxford, pp. 1-262
- [25] J. Planinić, V. Radolić, Z. Faj i B. Šuveljak, Radon equilibrium factor and aerosols, Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A, 396 (1997), 414-417
- [26] Kasić A., Adrović F., Kasumović A., Hankić E., Mjerenje koncentracije aktivnosti radona u Banjama Bosne i Hercegovine./ 9. Naučno stručni skup sa međunarodnim učešćem „QUALITY 2015“, Neum, 10.-13.06.2015., str:487-488
- [27] Committee on Risk Assessment of Exposure to Radon in Drinking Water. Risk Assessment of Radon in Drinking Water. Washington, D.C.: National academy press, 1999.
- [28] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), Sources and Effects of Ionising Radiation. Volume 1: Sources. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly with scientific annexes. New York: United Nations, 2000.
- [29] James, A. Lung Dosimetry // Nazaroff, W.; Nero, Jr., Radon and its decay products in indoor air: An Overview. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1988., Str. 259-304.
- [30] Radolić V., Šimatović V., Miklavčić I., Radon u vodi gradskih vodovoda u naseljima Osječko-baranjske županije./ VII. simpozij HDZZ, Opatija, 2008., str:304
- [31] Radolić V., Novaković L., Jerković G., Vuković B., Radon u kućama u Vukovarsko-srijemskoj županiji./ VII. simpozij HDZZ, Opatija, 2008, str: 286
- [32] Radolić V., Stanić D., Miklavčić I., Poje M., Petrinc B., Mužević M., Krpan I., Vuković B., Radon u tlu i vodi Ličko-senjske županije./ Odjel za fiziku Sveučilišta u Osijeku, Osijek, Institut za medicinska istraživanja i medicinu rada, Zagreb, str:207-208

## 7. POPIS SLIKA

Slika 1. Prodornost  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  čestica

Slika 2.  $\alpha$ -raspad

Slika 3.  $\beta$ -raspad

Slika 4.  $\gamma$ -raspad

Slika 5. Krivulja radioaktivnog raspada i vrijeme poluraspada atomske jezgre

Slika 6. Spektar elektromagnetskog zračenja

Slika 7. Lanac radioaktivnog raspada  $^{238}\text{U}$

Slika 8. Uranov raspadni niz

Slika 9. Aktinijev raspadni niz

Slika 10. Raspadanje radijizotopa  $^{226}_{88}\text{Ra}$

Slika 11. Presjek kroz Geiger-Müllerov brojač

Slika 12. Način mjerenja koncentracije radona

Slika 13. Krivulja radioaktivnog raspada radona

Slika 14. Alfa spektrometar DURRIDGE RAD7

Slika 15. Primjer alfa spektra radona i njegovih kratkoživućih potomaka dobivenih mjerenjem pomoću uređaja RAD7

Slika 16. Uređaj RAD7 s dodacima za mjerenje radona u vodi

Slika 17. Mehanizam prodiranja radona u stambeni objekt

Slika 18. Ovisnost k-faktora radona o temperaturi

Slika 19. Prikaz raspodjele koncentracije radona u RH-oj

## 8. POPIS TABLICA

Tablica 1. Radioaktivni raspadni nizovi

Tablica 2. Fizikalne karakteristike radona, kao i njegovih kratkoživućih potomaka

Tablica 3. Tipične koncentracije  $^{222}\text{Rn}$  na različitim mjestima na Zemlji

Tablica 4. Vrijednost koeficijenta emanacije za različite vrste tla i smrvljenih stijena

Tablica 5. Težinski faktori tkiva  $w_T$